

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

人工智能基础

高 济 朱淼良 何钦铭



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书为“教育部面向 21 世纪课程教材”,系统介绍了人工智能的基本原理、方法和技术,并反映了国内外人工智能领域研究和应用的最新进展。全书共 9 章,第一章阐述人工智能研究和应用的概况以及人工智能的发展;第二、三章介绍人工智能的基本概念、方法和技术,包括问题求解的基本方法和知识表示;第四章到第六章讨论人工智能技术的主要应用,包括:基于知识的系统、自动规划和配置、机器学习;第七章到第九章旨在拓广人工智能的研究和应用,包括非单调推理和软计算、机器感知、Agent 技术和信息基础设施智能化。

本书内容丰富,叙述脉络清晰,同时配有丰富的习题,可作为高等院校计算机及有关专业本科生教材,也可供工程技术人员参考使用。本书也可与教育部新世纪网络课程项目中的“人工智能”课程配套使用。

图书在版编目(CIP)数据

人工智能基础/高济,朱森良,何钦铭. —北京:
高等教育出版社,2002.8
本科、研究生教材
ISBN 7-04-011097-0

I. 人... II. ①高...②朱...③何... III. 人工智
能-高等学校-教材 IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 030987 号

人工智能基础

高 济 朱森良 何钦铭

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100009	网 址	http://www.hep.edu.cn
传 真	010-64014048		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
排 版	高等教育出版社照排中心		
印 刷	北京外文印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	2002 年 8 月第 1 版
印 张	30.75	印 次	2002 年 8 月第 1 次印刷
字 数	560 000	定 价	32.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

人工智能是 20 世纪下半叶兴起的一门新学科,被誉为 20 世纪的重大科学技术成就之一,并将在新世纪的网络经济时代发挥重要作用。作为计算机学科的重要分支,人工智能将渗透到应用计算机技术的各行各业,促进这些行业乃至计算机软件产业本身的变革。所以,让信息学科(尤其是计算机和自动化领域)和计算机应用密集的其他学科的研究生和本科高年级学生掌握人工智能的基础性知识,已成为国内外许多高校提高学生综合素质,培养高水平、复合型和创新型人才的一项重要举措。

浙江大学是国内最早进行人工智能研究的高校之一,并长期重视研究生和本科生的人工智能课程教学。基于科研和教学实践的丰富积累,我们认为人工智能技术是信息学科和其他学科领域提高计算机应用水平的重要工具。从而,“人工智能”课程的教学目标应定位在使这些学科领域的学生掌握人工智能技术的基本常识和培养开发应用的初级能力,为他们将来在各自学科领域开拓高水平的人工智能技术应用奠定基础。为此,本书对“人工智能”课程的教学内容作了大胆的革新,强调从工程应用的角度,深入浅出地系统介绍人工智能的基本原理、方法及应用技术,强化实用化介绍,并全面反映国内外研究和应用的新进展。

全书分 3 个部分:绪论、基础篇和提高篇。绪论即第一章,阐述人工智能研究的发展和基本原则。基础篇由 5 章构成,第二、三章介绍人工智能的基本概念、方法和技术,包括搜索、归约和逻辑推理等问题求解的基本方法以及知识表示的理论和方法;第四、五、六章讨论人工智能技术的主要应用,包括基于知识的系统,自动规划和配置,以及机器学习和知识发现。提高篇由七、八、九 3 章组成,旨在拓广人工智能的研究和应用,包括非单调推理、不确定推理、模糊推理、神经网络等新型问题求解技术,与感知相关的机器视觉和自然语言理解技术,以及 Agent 技术和信息基础设施的智能化。

本书前 6 章(即绪论和基础篇)适合于作为本科高年级学生的 2 学分课程;再加上后 3 章(即提高篇),可作为研究生的 3 学分课程。本书教学内容有以下特点:

(1) 将人工智能的基本概念、方法及技术清晰地划为两个方面:问题求解的基本方法(第二章)和知识表示(第三章);增加知识表示理论的阐述,并指出知识表示包括定义符号结构和推理机制两个部分(3.1 节);由此为学生独立设计 KB(基于知识的)系统奠定方法论基础。

(2) 强化人工智能技术的实用化介绍(2.4.4、3.3.2、3.4、4.2、4.3、5.2、5.3、7.2.3、7.3、7.4.3、7.5.4、9.3、9.4等节和第六章),以帮助学生理论联系实际,并为学生将来应用人工智能技术于各自的研究工作,提供指导性样板。

(3) 强化人工智能研究和应用新进展的介绍(4.4、5.2等节和第六、七、九章),使学生及时了解人工智能学科的前沿动向,激发他们应用新技术和做创新研究的热情。

本书前5章、第七章、第八章的后两节(自然语言理解)和第九章由高济编写,第八章的前3节(机器视觉)由朱森良编写,第六章由何钦铭编写,全书由高济修改和统编。

对于本书中出现的错误和不足之处,恳请各位专家和读者批评指正。

高 济
2002年3月
于浙江大学

目 录

第一章 人工智能研究的发展和基本原则	1
1.1 人工智能的研究和应用	1
1.2 人工智能研究的发展	5
1.3 人工智能研究的成果	6
1.4 人工智能研究的基本原则	10
1.5 存在的问题和发展前景	12
习题	14
参考文献	14
第二章 问题求解的基本方法	15
2.1 一般图搜索	15
2.1.1 状态空间搜索	15
2.1.2 启发式搜索	23
2.1.3 状态空间抽象和生成—测试法	29
2.1.4 启发式搜索的适用性讨论	31
2.2 问题归约	33
2.2.1 问题归约的描述	33
2.2.2 与或图搜索	38
2.2.3 与或图的启发式搜索	40
2.3 基于归结的演绎推理	44
2.3.1 谓词演算	44
2.3.2 归结演绎方法	51
2.3.3 归结反演	59
2.4 基于规则的演绎推理	63
2.4.1 基于规则的正向演绎推理	64
2.4.2 基于规则的逆向演绎推理	70
2.4.3 演绎推理的应用讨论	72
2.4.4 逻辑编程语言 Prolog	74
本章小结	82
习题	83
参考文献	87
第三章 知识表示	88

3.1 知识和知识表示	88
3.1.1 知识原则	88
3.1.2 知识表示的作用	89
3.1.3 知识表示的功能	91
3.1.4 知识表示的性能	92
3.1.5 基本的知识表示方式	93
3.2 产生式表示	96
3.2.1 产生式系统	96
3.2.2 控制策略	101
3.2.3 产生式系统的分类	105
3.3 结构化表示	107
3.3.1 语义网络	107
3.3.2 框架表示法	113
3.3.3 面向对象的表示法	117
3.4 知识表示的实用化问题	118
3.4.1 程序性和陈述性知识	118
3.4.2 表示能力和推理效率之间的制约关系	119
本章小结	124
习题	125
参考文献	127
第四章 基于知识的系统	129
4.1 KB 系统的开发	129
4.1.1 KB 系统的一般概念	129
4.1.2 KB 系统的体系结构原则	133
4.1.3 KB 系统的开发过程	135
4.1.4 KB 系统的开发工具和环境	137
4.2 设计基于产生式表示的 KB 系统开发工具	138
4.2.1 总体设计	138
4.2.2 Xps 的实现	141
4.2.3 应用实例——家族树	143
4.2.4 性能改进	146
4.2.5 开发工具 OPS5	147
4.3 专家系统实例——MYCIN	148
4.3.1 知识库的构造	149
4.3.2 推理机的设计	151
4.3.3 系统服务设施	155
4.3.4 开发工具 EMYCIN	157

4.4 问题求解的结构化组织	158
4.4.1 结构化组织的需求	159
4.4.2 事务表	160
4.4.3 黑板法	161
4.4.4 问题求解建模	163
4.4.5 新一代 KB 系统技术	167
本章小结	170
习题	171
参考文献	173
第五章 自动规划和配置	174
5.1 经典规划技术	174
5.1.1 经典规划技术的发展	174
5.1.2 规划的基本概念	175
5.1.3 早期的自动规划技术	179
5.1.4 部分排序规划技术	185
5.2 自动规划技术的新进展	189
5.2.1 非经典规划技术的开发	189
5.2.2 自动规划技术的实用化	190
5.2.3 智能的调度、规划和项目管理	193
5.3 自动配置	200
5.3.1 配置的一般概念	200
5.3.2 自动配置的建模	202
5.3.3 XCON——计算机自动配置系统	208
本章小结	214
习题	216
参考文献	217
第六章 机器学习	219
6.1 机器学习概论	219
6.1.1 机器学习的基本概念	219
6.1.2 机器学习的发展历史	220
6.1.3 机器学习分类	223
6.2 示例学习	229
6.2.1 示例学习的基本策略	230
6.2.2 决策树构造法 ID3	238
6.3 基于解释的学习	243
6.3.1 基于解释的泛化(EBG)	244
6.3.2 基于解释学习的若干基本问题	248

6.4 遗传算法	249
6.4.1 简单遗传算法	250
6.4.2 分类系统	253
6.5 加强学习	258
6.5.1 加强学习的基本方法	258
6.5.2 Q 学习	261
6.5.3 有关加强的进一步讨论	263
6.6 基于范例的学习	264
6.6.1 基于范例推理的过程	265
6.6.2 应用实例:智能饲料配方系统 ICIX	267
6.7 知识发现与数据挖掘	270
6.7.1 定理发现	270
6.7.2 数据挖掘	275
6.7.3 数据库及网络中的知识发现	278
本章小结	282
习题	284
参考文献	286
第七章 非单调推理和软计算	289
7.1 传统逻辑系统的局限性	289
7.2 非单调推理	290
7.2.1 非单调推理简介	291
7.2.2 非单调推理的形式化方法	293
7.2.3 真值维持系统	299
7.3 不确定推理	307
7.3.1 主观 Bayes 方法	307
7.3.2 确定性方法	314
7.3.3 D-S 证据理论	317
7.3.4 应用不确定推理的准则	322
7.4 模糊逻辑和模糊推理	322
7.4.1 模糊逻辑	323
7.4.2 模糊推理	325
7.4.3 模糊控制	330
7.5 神经网络	332
7.5.1 神经元和神经网络	333
7.5.2 面向映射变换的 BP 网	335
7.5.3 面向联想记忆的神经网络	339
7.5.4 神经网络的实现技术	344

本章小结	347
习题	350
参考文献	353
第八章 机器感知	354
8.1 视觉与视觉图像	354
8.1.1 视觉世界	355
8.1.2 计算机视觉	357
8.1.3 视觉图像	360
8.2 图像特征提取	364
8.2.1 线性特征的检测	364
8.2.2 图像的区域分割	367
8.3 视觉模型与识别	370
8.3.1 空间建模	371
8.3.2 模式识别	374
8.3.3 图像的理解	377
8.4 自然语言理解	382
8.4.1 自然语言理解的研究	382
8.4.2 单句理解	387
8.4.3 句法分析	388
8.4.4 增强的转变网络	392
8.4.5 语义分析	396
8.5 机器翻译	400
8.5.1 机器翻译的一般过程	400
8.5.2 多句理解	401
8.5.3 目标语言的生成	404
本章小结	405
习题	408
参考文献	409
第九章 Agent 技术和信息基础设施智能化	410
9.1 Agent 技术的研究和发展	411
9.1.1 Agent 技术的形成	411
9.1.2 Agent 的基本特征	412
9.1.3 Agent 技术的研究现状	413
9.1.4 Agent 分类概观	417
9.2 多 Agent 协作	419
9.2.1 合作型 Agent 体系结构 ARCHON	419
9.2.2 多 Agent 协作的建立	421

9.2.3 合作的协调	430
9.2.4 Agent 社会	443
9.3 Agent 通信	446
9.3.1 信息和知识共享	447
9.3.2 Agent 交互协议	451
9.3.3 通信促进服务	454
9.4 信息基础设施的智能化	457
9.4.1 技术挑战	458
9.4.2 智能系统的作用	459
9.4.3 虚拟组织的信息基础设施	463
本章小结	471
习题	476
参考文献	477

$$\begin{aligned}
& + m_3(\{a_1\}) \cdot m_4(\{a_1\})) \\
& = \frac{1}{0.84} \times (0.33 \times 0.24 + 0.30 \times 0.52 + 0.30 \times 0.24) \\
& = 0.37 \\
m(\{a_2\}) & = (m_3 \oplus m_4)(\{a_2\}) \\
& = K \cdot (m_3(U) \cdot m_4(\{a_2\}) + m_3(\{a_2\}) \cdot m_4(U) \\
& \quad + m_3(\{a_2\}) \cdot m_4(\{a_2\})) \\
& = \frac{1}{0.84} \times (0.33 \times 0.24 + 0.37 \times 0.52 + 0.37 \times 0.24) \\
& = 0.41
\end{aligned}$$

于是有

$$\begin{aligned}
Bel(A) & = \sum_{i=1} m(\{a_i\}) = 0.37 + 0.41 = 0.78 \\
Pl(A) & = 1 - 0 = 1 \\
f(A) & = Bel(A) + \frac{|A|}{|U|} \cdot [Pl(A) - Bel(A)] \\
& = 0.78 + 2/10 \times (1 - 0.78) \\
& = 0.82
\end{aligned}$$

7.3.4 应用不确定推理的准则

不确定推理仅是实现软计算的一种方式,并有其适用范围。应用不确定推理的准则可以归纳为以下3点:

(1) 尽可能避免使用统计表示,能确定性地解决问题的场合不应使用不确定推理,因为主观概率是不精确的,且在许多场合难以估计。例如字符识别系统应把字符表示为一组高级特征,做结构化模式识别;而不要表示为黑点集,做统计模式识别。

(2) 在必须采用不确定推理时,应将其限制在小范围内(相应于推理中的逻辑步);而不要在不能反映问题结构的大跨度操作中执行。

(3) 切记不确定推理结果的精度决不会超过输入数据的精度,不管采用什么技巧也无济于事,所以应尽量保持输入数据的精确性,否则结论的可信度只是误导。

7.4 模糊逻辑和模糊推理

由扎德(Zadeh)于1983年提出的模糊逻辑(Fuzzy Logic)建立在模糊集理论

的基础上,是一种处理不精确描述的软计算。与不确定推理处理随机事件发生的可能性相对照,模糊逻辑面向事物特性和能力的不精确描述。模糊逻辑的核心概念是语言变量。例如,当将人的年龄作为一个语言变量时,其可有3个以术语表示的定性值:轻、中、老。每个值均由称为隶属的一个函数加以定义。尽管年龄作为数值变量时其变量值更简单(如“年龄”等于25),但其值域有许多值(如1~100)。所以语言变量是一种形式的数据压缩(年龄只有3个定性值)。但这种压缩不同于定性物理中的量(值间隔)概念,因为语言变量的定性值是一种模糊值间隔,相互重叠,不存在用于分割连续值域的界标。

使用语言变量的主要方式是模糊规则和模糊图,本节只介绍前者。

7.4.1 模糊逻辑

1. 模糊集合及其运算

一个论域 U 中的元素 x 可以按其属性划分为子集。例如具有属性 a 的元素构成子集 A , 表示为

$$A = \{x/a(x)\}$$

传统的集合论中,元素 x 与子集 A 的关系只可能有两种: $x \in A (a(x)=1)$ 或 $x \notin A (a(x)=0)$, 视 x 是否有属性 a 而定。所以, $a(x)$ 也称为特征函数。然而,真实世界中的许多事物和概念却不能这样简单地描述。例如,上述年龄“轻”这个概念就找不到一个年龄数值作为年轻和中年的分界线。通常,30岁以下的人认为是年轻的,但30~40岁之间的人属年轻或中年就是很模糊的,且因人的观念和场合而异。

为表示类似这样的一些模糊概念,扎德于1965年提出了模糊集合理论,其基本思想就是把传统集合论中由特征函数决定的绝对隶属关系模糊化,使元素 x 对子集 A 的隶属程度不再局限于取0或1,而是可以取 $[0,1]$ 上的任何值,以指示元素 x 隶属于子集 A 的模糊程度。

为此,可以在论域 U 上定义一个模糊子集(简称模糊集) A , 其对 U 的任意元素 x 均指定一个值 $\mu_A(x) \in [0,1]$, 以表示它对 A 的隶属程度, 即有

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1]$$

$$A = \{x/\mu_A(x)\}$$

其中, μ_A 称为 A 的隶属函数。显然,当 $\mu_A(x)=1$ 时, x 确定性隶属于 A ; 而 $\mu_A(x)=0$ 时, x 确定性不隶属于 A ; x 取其他值时,隶属程度模糊。当 U 是离散元素的有限集时,即 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 模糊集 A 可表示如下:

$$A = x_1/\mu_A(x_1) + x_2/\mu_A(x_2) + \dots + x_n/\mu_A(x_n)$$

其中 $\mu_A(x_i)=0$ 的项可以省略。总之,一个模糊集 A 是以隶属函数 $\mu_A(x)$ 来描述的,隶属程度的概念构成模糊集理论的基石。

下面以人的年龄作为论域例来考察模糊集,设立以定性术语来描述年龄的语言变量“年龄”,其值域为;

年龄 = {轻, 中, 老}

可以为“年龄”的 3 个定性值分别建立隶属函数 μ_Y, μ_M 和 μ_O (如图 7.15 所示), 它们各以梯形或三角形表示。从图中可见,这 3 个隶属函数是相互重叠的,即年龄在 30~65 岁之间的人不能确定性地划归某一个子集。上述梯形或三角形的隶属函数,因其数学表达和运算简便,所占内存空间小,并且在许多场合下,与采用其他复杂

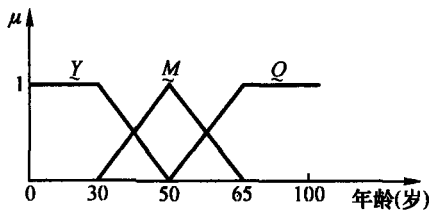


图 7.15 “年轻”、“中年”
“老年”的隶属函数

形状的隶属函数相比,在实现模糊推理和控制方面并无大的差别,已被广泛采用。当然,可以根据应用领域的特点和要求,设计各种更为精确的隶属函数。

与普通集合一样,对模糊集可以进行各种逻辑运算,主要的运算有并、交和余。设 A 和 B 均为论域 U 上的模糊集,则对于元素 x , A 与 B 并、交和余运算定义如下:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

作为例子,若论域 $U = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ 上有

$$A = x_1/0.9 + x_3/0.7 + x_4/0.5$$

$$B = x_1/0.8 + x_2/0.6 + x_4/0.4$$

则

$$A \cup B = x_1/0.9 + x_2/0.6 + x_3/0.7 + x_4/0.5$$

$$A \cap B = x_1/0.8 + x_4/0.4$$

$$\neg A = x_1/0.1 + x_2/1 + x_3/0.3 + x_4/0.5$$

可见,模糊集合的逻辑运算实质上就是隶属函数的组合运算过程

2. 模糊逻辑

模糊逻辑的基本思想是将常规数值变量模糊化,使变量成为以定性术语(也称语言值)为值域的语言变量。例如前述的语言变量“年龄”就以 3 个定性术语作为其值域。当用语言变量来描述对象时,这些定性术语就构成模糊命题。可

以省略被描述的对象,则模糊命题可表示为“<语言变量><定性值>”形式。例如张三“年龄轻”就是一个模糊命题,其模糊程度用定性术语“轻”的隶属函数来表示。然后可以对模糊命题作合取、析取、取反等逻辑操作。

每个模糊命题均由相应的一个模糊集做细化描述,所以模糊逻辑操作与模糊集操作是一致的。设 P_1, P_2, \dots, P_m 为论域 U_1, U, \dots, U 上的一组模糊命题,相应的隶属函数为 $\mu_{P_1}, \mu_{P_2}, \dots, \mu_{P_m}$, 当前观察的论域元素分别为 $x_{P_1}, x_{P_2}, \dots, x_{P_m}$; 令 P_V 和 P_\wedge 分别表示这些命题的析取和合取,则 P_V 和 P_\wedge 的隶属程度为

$$\mu_{P_V} = \max[\mu_{P_1}(x_{P_1}), \mu_{P_2}(x_{P_2}), \dots, \mu_{P_m}(x_{P_m})]$$

$$\mu_{P_\wedge} = \min[\mu_{P_1}(x_{P_1}), \mu_{P_2}(x_{P_2}), \dots, \mu_{P_m}(x_{P_m})]$$

令析取和合取隐含着 max 和 min 操作,则此二式可简写为

$$\mu_{P_V} = \bigvee_{i=1}^m \mu_{P_i}(x_{P_i})$$

$$\mu_{P_\wedge} = \bigwedge_{i=1}^m \mu_{P_i}(x_{P_i})$$

其中,不同的模糊命题可以面向同一论域,即使用相同的语言变量,但取用的定性值不同,隶属函数也不同。对于模糊命题的取反,则有

$$\mu_{\neg P}(x_P) = 1 - \mu_P(x_P)$$

让模糊命题的析取和合取隐含 max 和 min 操作,在一定程度上反映了客观规律,但这种平等看待各模糊命题的观念有时仍不符合实际。在真实世界中,影响问题求解的因素往往具有不相同的相对重要性。例如一个模糊控制器的输入变量是与标准温度的温差 θ 和温度变化速率 $d\theta$, 输出为恒温加热器液体燃料流量的修正量 y (如图 7.16 所示); 为保持恒温,若控制温差比控制温度变化率更有效,就应加强温差对流量修正的影响。这可以通过引入加权模糊逻辑来解决。

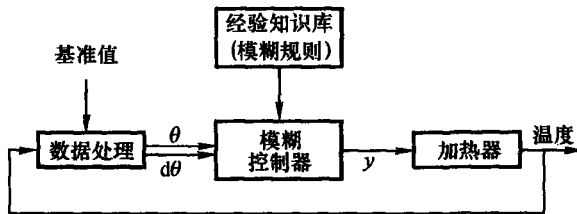


图 7.16 一个模糊控制器的控制过程

7.4.2 模糊推理

模糊推理有多种模式,其中最重要的且广泛应用的是基于模糊规则的推理。

模糊规则的前提是模糊命题的逻辑组合(经由合取、析取和取反操作),作为推理的条件;结论是表示推理结果的模糊命题。所有模糊命题成立的精确程度(或模糊程度)均以相应语言变量定性值的隶属函数来表示。

模糊规则由应用领域专家凭经验知识来制定,并可在应用系统的调试和运行过程中,逐步修正和完善。模糊规则连同各语言变量的隶属函数一起构成了应用系统的知识库。基于规则的模糊推理实际上是按模糊规则指示的模糊关系 R 做模糊合成运算的过程。

建立在论域 U_1, U_2, \dots, U_n 上的一个模糊关系 R 是笛卡尔积 $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ 上的模糊集合。若这些论域的元素变量分别为 $X_{U_1}, X_{U_2}, \dots, X_{U_n}$ 则 R 的隶属函数记为 $\mu_R(X_{U_1}, X_{U_2}, \dots, X_{U_n})$ 。模糊关系 R 可形式地定义为

$$\begin{aligned} \mu_R &: U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n \rightarrow [0, 1] \\ R &= \{ (X_{U_1}, X_{U_2}, \dots, X_{U_n}) \mid \mu_R(X_{U_1}, X_{U_2}, \dots, X_{U_n}) \} \end{aligned}$$

在模糊推理中,尚未建立一致的理论去指导模糊关系的构造。这意味着存在多种构造模糊关系的方法,相关的模糊合成运算方法也不同,从而形成了多种风格的模糊推理方法。不过,基于 $\max - \min$ 原则的算法占据了目前模糊推理方法的主流。尽管这些算法不能说是最优的,但易于实现并能有效地解决实际问题,因此它们已广泛地应用于模糊推理。

1. 直接基于模糊规则的推理

当模糊推理的输入信息是量化的数值时,可以直接基于模糊规则做推理,然后把推理结论综合起来,典型的推理过程可以分为两个阶段,其中第一阶段又分为 3 个步骤,表述如下:

(1) 计算每条模糊规则的结论:①输入量模糊化,即求出输入量相对于语言变量各定性值的隶属度;②计算规则前提部分模糊命题的逻辑组合(合取、析取和取反的组合);③将规则前提逻辑组合的隶属程度与结论命题的隶属函数作 \min 运算,求得结论的模糊程度。

(2) 对所有规则结论的模糊程度作 \max 运算,得到模糊推理结果。

作为例子,观察如图 7.16 所示的模糊控制。设想经验知识库中包括 9 条规则,如表 7.1 所示。描述温差 θ 、温度变化率 $d\theta$ 和燃料流量修正量 y 这 3 个论域的语言变量具有相同的定性值和隶属函数,且这 3 个论域均归化到实数域 $[-1, 1]$ 上。这些定性值取以下术语:

NB (负大), NS (负小), ZO (零), PS (正小), PB (正大)

相应的隶属函数如图 7.17 所示。设模糊控制器当前输入的数量值为: $\theta = 0.8, d\theta = 0$, 则有两规则激活:

表 7.1 以二维表描述的模糊规则(共 9 条)

		$d\theta$				
		NB	NS	ZO	PS	PB
y	NB			PB		
	NS			PS		
	ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
	PS			NS		
	PB			NB		

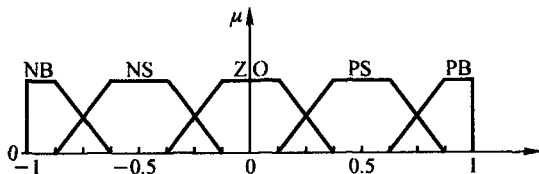


图 7.17 5 个隶属函数

$$PS \wedge ZO_{d\theta} \Rightarrow NS_y, PB_{\theta} \wedge ZO_{d\theta} \Rightarrow NB$$

从图 6.7 可知,输入量的隶属度为:

$$\mu_{PS}(0.8) = 0.3$$

$$\mu_{PB}(0.8) = 0.7$$

$$\mu_{ZO_{d\theta}}(0) = 1$$

于是,基于 $\max - \min$ 原则,可以分别计算这两条规则结论的模糊程度(分别以 μ_1 和 μ_2 指示):

$$\mu_1(y) = (\mu_{PS_y}(0.8) \wedge \mu_{ZO_{d\theta}}(0)) \wedge \mu_{NS}(y) = \min[0.3, \mu_{NS}(y)]$$

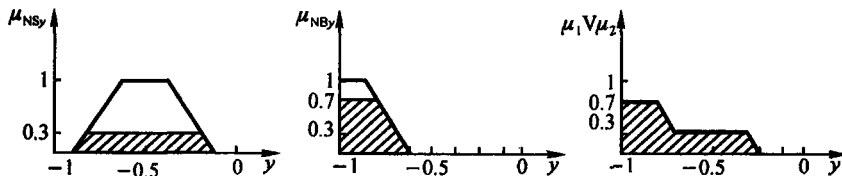
$$\mu_2(y) = (\mu_{PB_{\theta}}(0.8) \wedge \mu_{ZO_{d\theta}}(0)) \wedge \mu_{NB}(y) = \min[0.7, \mu_{NB}(y)]$$

$\mu_1(y)$ 和 $\mu_2(y)$ 实际是将 μ_{NS} 和 $\mu_{NB}(y)$ 的 0.3 和 0.7 以上部分切去后的结果,这种 \min 运算也称切头法(如图 7.18 所示)。最后对 $\mu_1(y)$ 和 $\mu_2(y)$ 作 \max 操作,得到模糊推理结果(记为模糊集 H) $\mu_H(y) = \mu_1(y) \vee \mu_2(y)$ 。

设燃料流量修正量这个论域为有限离散值的集合,即将实数域 $[-1, 1]$ 分成 8 个等级,级差为 0.25,则有

$$A_{NS} = -0.75/0.5 + -0.5/1 + -0.25/0.5$$

$$A_{NB} = -1/1 + -0.75/0.5$$

图 7.18 阴影部分表示 μ_1 、 μ_2 和 $\mu_1 \vee \mu_2$

令 A_H 和 A_H 分别指示相应于这两条规则的推理结果模糊集,则有

$$A = -0.75/0.3 + -0.5/0.3 + -0.25/0.3$$

$$A_H = -1/0.7 + -0.75/0.5$$

$$A = A_H \cup A_H = -1/0.7 + -0.75/0.5 + -0.5/0.3 + -0.25/0.3$$

2. 基于模糊关系的推理

当模糊推理的输入信息是定性术语(以相应的模糊集表示)时,可以基于模糊关系做推理。如前所述,存在多种构造模糊关系的方法,这里仅介绍简单直观的 Mamdani 方法。

设模糊规则形如 $P \Rightarrow H$, 与模糊命题 P 和 H 相应的模糊集 A_P 和 A_H 分别建立在论域 U_P 和 U_H 上(相应的元素变量为 x_P, x_H)。令 $R(P; H)$ 指示从 P 推出 H 的模糊关系,则定义

$$R(P; H) = A_P \times A_H = \{(x_P, x_H) / \mu_R(x_P, x_H)\}$$

$$\mu_R(x_P, x_H) = \mu_A(x_P) \wedge \mu_A(x_H)$$

当实际的输入信息是模糊命题 P' (相应的模糊集为 $A_{P'}$)时,则模糊推理的输出 H' (相应的模糊集为 $A_{H'}$)表示为

$$A_{H'} = A_{P'} \cdot R(P; H)$$

$$\mu_{A_{H'}} = \bigvee_{x \in U} (\mu_{A_{P'}}(x_P) \wedge \mu_R(x_P, x_H))$$

作为例子,设 $U_P = U_H = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 是关于长度的论域,论域中元素的量度单位是“米”。现有模糊规则为“ x_P 短 \Rightarrow x_H 长”,定义定性术语“短”和“长”模糊集 A_P 和 A_H 分别为(隶属程度为 0 的项省略):

$$A_P = 1/1 + 2/0.8 + 3/0.3 + 4/0.1$$

$$A_H = 2/0.1 + 3/0.3 + 4/0.8 + 5/1$$

在求模糊关系时,忽略模糊集中元素的表示(以排列次序指示),则 $R(P; H)$ 、